

УДК 53.09:621.791

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Р.А. Кректулева

Томский политехнический университет

E-mail: rakrekt@mail.ru

Рассмотрены основные особенности взаимодействия кислородной струи с металлом в зоне реза. Для их описания предложена математическая модель, включающая уравнения баланса массы, количества движения, энергии, уравнение состояния и уравнение кинетики окислительных процессов. Из решения общей системы уравнений получен ряд аналитических соотношений, указывающих на неиспользованные резервы и раскрывающих возможности повышения ресурсоэффективности технологии кислородной резки.

### Ключевые слова:

Кислородная резка, моделирование, истечение, газовая струя, вязкость газа, скорость струи, окисление, плавление.

### Key words:

Oxygen cutting, simulation, effusion, gas jet, viscosity, jet velocity, oxidizing, melting.

### Введение

Качественное разделение металла на отдельные части заданной геометрии является актуальной технологической проблемой. В этой связи до сих пор в России и за рубежом не ослабевает интерес ученых и практиков к всестороннему изучению возможностей кислородной резки металлов [1–3]. В данном случае под кислородной резкой понимается газотермический способ резки. При этом материал в зоне реза расплавляется за счет выделения тепла при окислении в процессе взаимодействия со струей кислорода и этой же струей, подаваемой при повышенном давлении, выносятся из зоны реза. Благодаря наличию надежных аппаратов кислородной резки, доступности в реализации и экономичности эта технология может быть применима не только в условиях хорошо оснащенного производства, но и в любых других условиях (на трассах нефте- и газопроводов, при разделке и утилизации крупногабаритных объектов: корпусов кораблей, колесных пар железнодорожных вагонов и тому подобное). При этом резание может осуществляться, как вручную, так и механизированными способами. По-прежнему остается высокой производительность кислородной резки по сравнению с другими методами: резкой дисковыми пилами, вырубкой пневмомолотами, электроэрозионной резкой и прочими. Особенно актуальна кислородная резка стальных образцов большой толщины (свыше 30 мм).

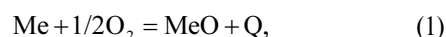
Среди неоспоримых достоинств данной технологии есть ряд недостатков, которые ограничивают ее применение. К ним относятся неперпендикулярность кромок реза, их шероховатость, неоднородность структуры материала кромок и, как следствие, их охрупчивание и растрескивание. Все это требует дополнительных способов обработки поверхности зоны реза (механической, ультразвуковой и других) в зависимости от последующего назначения разрезаемых образцов.

Целью настоящего исследования является разработка теоретических представлений о процессах, про-

текающих при взаимодействии кислородной струи с разрезаемым металлом и поиск решений по совершенствованию технологии кислородной резки.

### Характеристика технологических процессов кислородной резки

В основе технологии кислородной резки лежит использование свойства некоторых металлов при окислении выделять большое количество теплоты.



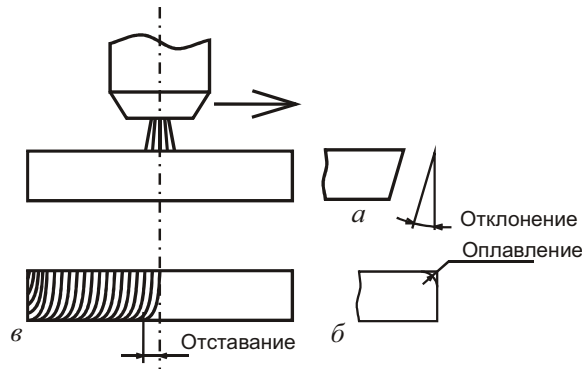
где  $Q$  – выделившееся тепло.

Как правило, при дополнительном начальном подогреве интенсивность окислительных процессов усиливается, поэтому технологический процесс обеспечивается двумя факторами: начальным подогревом зоны реза и подачей кислородной струи в зону реза. Когда процесс стабилизируется, подогревающее пламя убирают. Начальная температура подогрева для различных материалов разная, для железа и низколегированных сталей она составляет около 1400 К.

В технологии кислородной резки струя режущего кислорода является одним из основных инструментов, обеспечивающих качество и производительность технологического процесса. Известно [1], что характер истечения кислородной струи зависит от многих причин: размеров и конфигурации сопла, величины подаваемого давления, температуры, угла наклона к поверхности разрезаемого металла. Первоначальная конфигурация боковых стенок реза для образцов большой толщины искажается по мере заглубления струи, что сказывается и на характере ее истечения, рисунок.

На практике подбор всех перечисленных параметров осуществляется эмпирически и является приближенным. Технология кислородной резки тонколистовых сталей (толщиной до 10 мм) отработана хорошо и не вызывает нареканий. Качество реза заметно ухудшается при резке металлов толщиной свыше 30 мм. Именно на таких толщинах

возникают оплавление кромок реза, отставание проплавления в нижней части по сравнению с поверхностью, образование бороздчатых стенок реза и прочее. Трудности в подборе режимов для больших толщин не устранены до сих пор. Задача строго обоснованного выбора технологических режимов и соответствующего оборудования может быть решена при более глубоком изучении проблемы. Для этого необходимо создание адекватной математической модели процесса.



**Рисунок.** Схема формирования зоны реза: а – угол отклонения стенок реза от вертикали, б – кривизна оплавления верхних кромок, в – отставание длины реза с глубиной

#### Математическое описание физических процессов при взаимодействии кислородной струи с металлом

Экспериментальные исследования показали, что при выходе кислорода на срезе сопла его температура составляет  $T_0=137...188$  К [4]. При соприкосновении струи с поверхностью металла ее температура в пограничном слое за счет адиабатического торможения повышается до значений  $T_1=280...320$  К. По мере продвижения струи вглубь разреза температура ее поверхности увеличивается до значения  $T_2=1850...1900$  К за счет разогрева от соприкосновения с расплавом и за счет трения. Однако из-за высокой степени турбулентности и более низкой температуры в ядре струи происходит быстрое перемешивание газа и выравнивание температуры по сечению струи, так что на выходе из нижней части реза температура струи составляет  $T_{\text{вых}}=300...420$  К.

Отметим одну важную особенность, связанную с неравномерным разогревом кислородной струи, которая нередко игнорируется при описании технологического процесса кислородной резки. Речь идет о том, что в газах (в отличие от твердых тел и жидкостей) с повышением температуры  $T$  существенно увеличивается динамическая вязкость  $\mu$ . Опыт показывает, что описание этой зависимости в широком интервале температур хорошо интерполируется формулой Сатерленда [5]:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  и  $T_0$  – коэффициент вязкости и температура, соответствующие некоторому начальному состоянию;  $T_s$  – постоянная Сатерленда, ее значения для ряда газов приведены в таблице.

**Таблица.** Значения постоянных Сатерленда для газов

Газ	$T_s$ , К	Газ	$T_s$ , К
Воздух	114	Гелий	80
Азот	107	Аммиак	626
Кислород	138	Ацетилен	198
CO <sub>2</sub>	250	Хлор	351
Водород	75	Водяной пар	673
Метан	198		

Используя табличные данные, по формуле (2) находим, что динамическая вязкость кислорода в режущей струе в зависимости от степени нагрева увеличивается в 4 и более раз. Этот фактор указывает на то, что при удалении струи от среза сопла ее размытие можно предотвратить за счет более сильного разогрева и повышения тем самым упругости струи. Поясним сказанное с помощью закона Ньютона:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dn}. \quad (3)$$

Согласно этому закону касательное напряжение  $\tau$  (сила внутреннего трения между частицами газа, отнесенная к единице поверхности) пропорциональна изменению скорости  $V$  по нормали  $n$  к направлению движения. Поскольку в газах коэффициент динамической вязкости  $\mu$  сильно зависит от температуры (и почти не зависит от давления), то это как раз и означает, что повышение температуры в кислородном потоке приведет к увеличению внутреннего трения и касательных напряжений в струе. Для стабилизации течения газовой (кислородной) струи большое значение имеет коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , определяемый как

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность. Учитывая, что плотность газов уменьшается обратно пропорционально росту температур (это следует из уравнения состояния идеальных газов), величина  $\nu$  с ростом температуры быстро растет. Таким образом, из соотношений (2)–(4) следует, что путем повышения температуры газа увеличивается его вязкость, а это, в конечном счете, приводит к стабилизации кислородной струи.

Анализ литературных данных по газодинамике струй показал, что это не единственно возможный путь. Рассмотрим особенности газодинамического поведения кислородной струи с учетом того, что при взаимодействии струи с разогретым металлом, происходит его окисление, и выделившаяся тепловая энергия воздействует на ядро струи. Для решения поставленной задачи воспользуемся следую-

шей системой уравнений [4], являющейся одномерным аналогом законов сохранения массы, количества движения, энергии. Дополним ее уравнением химической кинетики окисления и уравнением состояния газа [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U) &= 0, \\ \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0, \\ \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_v U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \frac{\partial U}{\partial x} &= q, \\ \frac{dm}{dt} &= \frac{R \sigma_0 S}{z F^2} (N_a + N_k) N_s \left( \frac{\partial T}{\partial h} \ln(P) + T \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial h} \right), \\ P &= \rho R T, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U$  – скорость;  $T$  – температура;  $P$  – давление;  $C_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;  $q$  – тепловой поток от реакции окисления металла;  $m$  – масса окислившегося металла;  $\sigma_0$  – начальная проводимость оксида,  $S$  – площадь сечения оксидной пленки;  $z$  – величина заряда ионов;  $F$  – постоянная Фарадея;  $N_k$  – число заряженных ионов кислорода;  $N_s$  – число электронов;  $N_a$  – число заряженных ионов металла;  $t$  – время;  $h$  – переменная толщина пленки;  $R$  – универсальная газовая постоянная, отнесенная к одному молю вещества.

Отметим, что введение в математическую модель уравнения кинетики окисления позволяет более детально исследовать механизмы взаимодействия режущей струи с разрезаемым металлом в зависимости от тепловых процессов в зоне реза.

Количество теплоты, выделившейся в единицу времени в единице объема в результате химической реакции, запишем в виде:

$$q = \dot{m} Q, \quad (6)$$

где  $\dot{m}$  – массовая скорость химической реакции, определяемая из уравнения химической кинетики окисления,  $Q$  – тепловыделение в процессе окисления железа, определяемое соотношением (1).

Для анализа теплового воздействия от химической реакции на общее решение системы (5) преобразуем уравнение энергии с учетом уравнения состояния газов:

$$\frac{C_v}{R} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{C_v}{R} U \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \frac{\partial U}{\partial x} = q. \quad (7)$$

Затем перепишем уравнение (7) в виде:

$$\frac{C_v}{R} \frac{\partial P}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{C_v}{R} U \frac{\partial P}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial U}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = q. \quad (8)$$

Используем термодинамическое тождество из работы [7]:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \rho^2 \left( \frac{\partial U}{\partial \rho} \right)^2 = RT. \quad (9)$$

Сделаем в уравнении (8) замену переменных с учетом (9), в результате преобразований получим:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \left( U + C_v \sqrt{\frac{R}{T}} \right) = \frac{q}{C_v T}. \quad (10)$$

В соответствии с уравнением химической кинетики массовая скорость химической реакции пропорциональна температуре  $\dot{m} \sim T$ . Тогда с учетом соотношения (6) можно принять, что правая часть уравнения (10) в явном виде от температуры не зависит, обозначим ее  $q_1$ .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \left( U + C_v \sqrt{\frac{R}{T}} \right) = q_1. \quad (11)$$

Уравнение (11) отражает волновой характер массопереноса в кислородной струе с учетом энергетической «подкачки». Физический смысл коэффициента перед производной  $\frac{\partial \rho}{\partial x}$  по определению есть скорость переноса вдоль координаты  $x$ :

$$V = U + C_v \sqrt{\frac{R}{T}} = \left( q_1 - \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) / \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right). \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует, что в зависимости от величины знака  $q_1$ , то есть от направления подкачки дополнительной энергии в волну, она будет либо ослаблять скорость фронта волны, либо усиливать ее. Этот результат указывает на еще один принципиально другой способ сохранения энергии режущей струи при ее заглублении в материал.

В технологии кислородной резки металлов применяемый диапазон истечения газа достаточно широк: от 100 до 600 м/с, то есть он охватывает как дозвуковые, так и сверхзвуковые течения для многих типов газов [8].

В газовой динамике установлено, что течение газа при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях качественно отличаются друг от друга. Рассмотрим эти особенности в приложении к технологии кислородной резки.

Запишем для некоторого интервала времени  $\Delta t$  уравнение массового расхода кислорода и уравнение энергии:

$$\begin{aligned} m &= \rho V \pi d^2, \\ \Delta Q_g &= \Delta H + \Delta \left( \frac{V^2}{2} \right) + \Delta A, \end{aligned} \quad (13)$$

здесь  $d$  – диаметр сопла на выходе;  $\Delta Q_g$  – изменение внутренней энергии газа за счет тепла, подводимого извне;  $\Delta H$  – изменение энтальпии;  $\Delta V^2/2$  – изменение кинетической энергии газа;  $\Delta A$  – механическая работа, совершаемая газом за время  $\Delta t$ .

Проведем преобразования системы уравнений (13), продифференцируем уравнение массового расхода:

$$dm = VS \partial \rho + \rho V dS + \rho S dV, \quad (14)$$

где  $S = \pi d^2$ . Затем поделим уравнение (14) на первое уравнение из (13):

$$\frac{dm}{m} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dS}{S}, \quad (15)$$

тогда уравнение состояния газов, последнее уравнение в системе (5), с учетом (15) можно преобразовать к виду:

$$\frac{dP}{\rho} = RdT + RT \left( \frac{dm}{m} - \frac{dV}{V} - \frac{dS}{S} \right). \quad (16)$$

Воспользуемся известным из термодинамики соотношением для энтальпии:

$$H = \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT, \quad (17)$$

где  $\gamma = C_p/C_v$ , — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме.

Традиционно скорость звука в газе определяется, как

$$c = \sqrt{\gamma RT}. \quad (18)$$

Если учесть, что кроме механической работы в кислородной струе совершается еще и работа вязких сил, то в таком случае имеет место обобщенное уравнение Бернулли:

$$VdV + \frac{dP}{\rho} + dA_{\text{вяз}} + dA = 0. \quad (19)$$

Уравнение (19) с учетом соотношений (16)–(18) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\gamma} (V^2 - c^2) \frac{dV}{V} = \\ & = \frac{c^2}{\gamma} \left( \frac{dS}{S} - \frac{dm}{m} \right) - \frac{1}{\gamma} dA - \frac{\gamma - 1}{\gamma} dQ_{\text{с}} - dA_{\text{вяз}} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Поделив обе части выражения (20) на  $c^2/\gamma$ , получим:

$$\begin{aligned} & (M^2 - 1) \frac{dV}{V} = \\ & = \frac{dS}{S} - \frac{dm}{m} - \frac{1}{c^2} dA - \frac{\gamma - 1}{c^2} dQ_{\text{с}} - \frac{\gamma}{c^2} dA_{\text{вяз}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $M = V/c$  — число Маха.

Уравнение (21) выражает условие обращения воздействий [9] для кислородной струи, испытывающей приток внешней энергии. Смысл этого уравнения заключается в том, что оно устанавливает связь между изменением скорости струи в процессе резки и внешним воздействием на поток. Из выражения (21) видно, что влияние внешних воздействий одного и того же знака на скорость потока при дозвуковых и сверхзвуковых режимах течения имеет противоположный знак. Например, сообщая дозвуковому потоку теплоту  $dQ_{\text{с}} > 0$ , при отсутствии других внешних воздействий ( $dS = 0$ ,

$dm = 0$ ,  $dA = dA_{\text{вяз}} = 0$ ) имеем:

$$(M^2 - 1) \frac{dV}{V} = - \frac{\gamma - 1}{c^2} dQ_{\text{с}}. \quad (22)$$

Из (22) видно, что при  $M < 1$ , то есть в дозвуковой области, скорость струи будет увеличиваться, но только до значений  $M = 1$  ( $V = c$ ). При переходе через этот барьер картина будет ровно противоположной: дополнительный приток теплоты будет замедлять скорость струи при сверхзвуковом истечении. Этот эффект экспериментально исследован в работе [10]. Следовательно, в момент перехода через границу  $M = 1$ , чтобы перевести дозвуковую скорость в сверхзвуковую, необходимо в закритической области изменить знак внешнего воздействия на противоположный. Аналогично устанавливается, что расширения трубки тока ( $dS > 0$ ), отвод массы ( $dm < 0$ ), совершение работы над газом ( $dA > 0$ ) уменьшают скорость дозвукового потока и увеличивают скорость сверхзвукового потока.

Описанные механизмы управления скоростью кислородной струи имеют прямое отношение к увеличению производительности кислородной резки, что особенно актуально для резки металла большой толщины, когда другие способы малоэффективны [11]. Выполненный теоретический анализ расширяет средства рационального конструирования технологии газотермической резки металлов, предложенные в работах [6, 12].

#### Выводы

1. Предложена математическая модель и сформулированы основные принципы управления режущей силой кислородной струи при кислородной резке металлов.
2. На основе математической модели показано, что повышение ресурсоэффективности при резке металлов больших толщин может быть реализовано на сверхзвуковых скоростях. Для сохранения режущей силы струи необходимо предусмотреть расширение выходного сечения режущего сопла по мере заглубления струи внутрь металла. При резке металла на дозвуковых скоростях для повышения качества реза и уменьшения расхода газа выходное сечение следует соответственно уменьшать.
3. Показано, что увеличению скорости резки на сверхзвуковых скоростях также будет способствовать принудительный отток расплавленного металла из зоны реза, а при дозвуковой скорости — дополнительный приток тепла в режущую струю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Н.И., Нешумова С.П., Антонов И.А. Справочник газосварщика и газорезчика. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1999. – 239 с.
2. Adedayo A.V. Elucidation on Reactions Thermodynamics and Kinetics of OFC-A of Steels // Journal of Minerals, Materials Characteristics, Engineering. – 2010. – V. 9. – № 7. – P. 607–619.
3. Горбач В.Д., Никифоров Н.И. Развитие и применение автоматической термической резки на предприятиях судостроения, металлургии и машиностроения Российской Федерации // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 120–128.
4. Пирумов У.Г. Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
5. Романенко П.Н. Теплообмен и трение при градиентном течении жидкостей. – М.: Энергия, 1971. – 568 с.
6. Никифоров Н.И., Сухинин Г.К., Кректулева Р.А., Бежин О.Н., Губенко Л.В. Результаты компьютерных и натурных экспериментов по высокоскоростной кислородной резке металла // Автоматическая сварка. – 2000. – № 5. – С. 21–24.
7. Кректулева Р.А., Герасимов А.В. Пространственное распространение ударного импульса в конденсированных градиентных средах // Численные методы решения задач упругости и пластичности / под ред. В.М. Фомина. – Новосибирск: Изд-во ИТПМ, 1995. – С. 104–108.
8. Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
9. Вахгельт А.Ф., Егоров В.М. Внутренние задачи прикладной газовой динамики. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1988. – 118 с.
10. Малов А.Н., Оришич А.М., Фомин В.М., Внучков Д.А., Наливайченко Д.Г., Чиркашенко В.Ф. Исследование структуры сверхзвуковых течений воздуха с подводом энергии от квазистационарного оптического разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 155–160.
11. Никитин А.К. Кислородная резка сталей больших толщин // РИТМ. – 2010. – № 7. – С. 42–44.
12. Никифоров Н.И., Кректулева Р.А. Математическое моделирование технологического процесса кислородной резки // Сварочное производство. – 1998. – № 4. – С. 3–6.

УДК 548.55:669.015.5:539.23

Поступила 07.07.2011 г.

## К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ ОСОБО ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УРОВНЯ (СОСТОЯНИЯ)

А.Н. Порядина, А.М. Апасов

Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ  
E-mail: mchmyti@rambler.ru

Обобщены достигнутые в последнее время основные экспериментальные результаты в области получения ряда металлов в особо чистом состоянии и исследования их свойств. Кратко изложены основные принципы физических методов рафинирования металлов (дистилляция, плавка и зонная перекристаллизация) с применением вакуумной и сверхвысоковакуумной техники. Показана перспектива комплексного применения физических методов рафинирования для глубокой очистки металлов. Процессы дистилляции в вакууме позволяют конструировать особо чистые металлы нанокристаллического уровня путем регулируемой сборки из отдельных атомов и, следовательно, получать металлы с заранее заданными свойствами и структурой.

### Ключевые слова:

Металлы в особо чистом состоянии, физические методы рафинирования металлов, дистилляция, плавка и зонная перекристаллизация, вакуум, структура, свойства.

### Key words:

Metals in a high-purity state, physical methods of metals purification, distillation, melting and zone recrystallization, vacuum, structure, properties.

### Введение

На текущий момент времени достигнут высокий уровень чистоты многих полупроводниковых материалов [1, 2]. Так, суммарное содержание основных примесных элементов в лучших образцах германия, кремния не превышает  $10^{11}$ – $10^{12}$  ат./см<sup>3</sup>, в арсениде галлия –  $10^{14}$ – $10^{15}$  ат./см<sup>3</sup>. Несмотря на то, что для технологий глубокой очистки веществ характерны высокие научно- и капиталоемкость (причем материальные затраты растут нелинейно с повышением степени очистки [3]), повышение чистоты материалов для микроэлектроники продолжает оставаться актуальным. Высокая степень чистоты материалов предопределяет рост экономической эффективности их использования:

расширяются функциональные возможности, улучшаются эксплуатационные характеристики.

Научная проблема подобного уровня стоит и перед металлами: актуальность проводимых комплексных исследований в области особо чистых металлов несомненна [4–6]. Это объясняется тем, что:

- высокочистые металлы – это «особое» фазовое состояние вещества, находящегося в экстремальных условиях, при котором кардинально изменяется поведение известных свойств и выявляются совершенно новые фундаментальные, ранее «скрытые» примесными элементами и соединениями, а также структурными дефектами различного уровня;